Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 1, Mar- Apr 2023, p. 145-168

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۲ ص.۱۶۸-۱۴۵

Homepage: http://ifstrj.um.ac.ir
Research Paper

Modeling the Ultrasonic Atomization Process of Milk and Powder Production Using Spray Drying Method

A. Heydari[1*], M. Goharimanesh[2], M.R. Gharib[3], A. Koochi[4]

Received: 2022.04.24
Revised: 2022.05.29
Accepted: 2022.05.31
Available Online: 2022.05.31

How to cite this article:
Heydari, A., Goharimanesh, M., Gharib, M.R., & Koochi, A. (2023). Modeling the ultrasonic atomization process of milk and powder production using spray drying method. *Iranian Food Science and Technology Research Journal 19*(1): 145-168. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.75615.1154

Introduction

The beneficial use of ultrasonic systems has been proven in many applications. Among them, ultrasonic atomization is widely used in various industries, including food and coating industries. Ultrasonic vibrations of liquids can produce fine droplets called atomized fluid. During the fluid atomization process, droplet size and distribution can be precisely controlled so that the droplets become very small and high-level particle distribution is achieved which can be easily evaporated. This method is widely used in various industries, including food industry (for the production of driedpowder products) and coating industry. The key factor that affects droplet size is the frequency and amplitude of the ultrasonic vibrations and the properties of the fluid, including the fluid viscosity and surface tension.

Materials and Methods

Based on a review of literature, it is clear that the modeling of the ultrasonic method for spray dryers and the production of milk powder has not been done so far. In the present work, first, the research background is reviewed and then, using the relationships provided for the ultrasonic atomization of different fluids in the reviewed articles, the effect of ultrasonic vibrations on the atomization and evaporation of milk as a food and the powder production was studied using spray drying process. Then the effects of various oscillation parameters such as frequency, amplitude and also the temperature of the fluid, which affects its viscosity, density and surface tension, on the rate of atomization of the fluid was investigated. In the present work, we first examine the fluid whose range of properties is true in relations. One of the most widely used liquids in the food industry is milk. By examining the viscosity, surface tension and density of the milk and obtaining the dimensionless numbers *We*, *In* and *Oh*, it is determined that the provided relations can also be used for milk. After calculating the diameter of the evaporated particles of milk due to ultrasonic vibrations as well as the evaporation rate, the independent variables of the research can be changed. First, in the constant physical properties of a fluid, we change the frequency and amplitude of ultrasonic oscillations and studied their effect on the produced particle diameter and evaporation rate. In the next step, with the constant frequency and amplitude of ultrasonic oscillations, the effect of changes in fluid properties (temperature change) on the produced particle diameter and evaporation rate was investigated. In the next stepthe effect of frequency and amplitude of ultrasonic fluctuations as well as changes in fluid properties (temperature change) on the powder diameter produced and the time required for the drying process was investigated. The analysis of all data obtained from the above steps was performed using Mathlab software.

Results and Discussion

The main and summary results obtained from the present study are as follows:

- As the amplitude of the vibrations and the temperature of the milk increased, the drying time required for the evaporation of droplets decreased, but the powder diameter and the evaporation rate increased.

1, 2, 3 and 4- Assistant Professors, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: a.heydary@torbath.ac.ir)
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2022.75615.1154

- As the frequency of vibrations increased, the drying time required for the evaporation of droplets increased, but the powder diameter and the evaporation rate decreased.
- The results showed that quadrupling the amplitude of the vibrations reduces the time required for the droplets to dry by 14.4% and increases the evaporation rate by 62.6%. At a constant temperature of the gas dryer and the milk, changing the frequency from 10 to 40 kHz results in 21.4% increase in the time required for the droplets to dry. Also, with increasing the temperature of the milk from 15 to 30°C, at a constant frequency and amplitude of vibrations, the time required for drying the droplets decreases by 12.4% and the diameter of the particles produced increases by 11.3%.

Conclusion

In this research, the process of ultrasonic assisted evaporation of whole milk and drying and production of milk powder has been modeled mathematically and thermodynamically. The calculation code was written using Mathlab software and after making sure that the solution conditions are in the desired range of equations, the results were presented. In the present work, the effect of the frequency and amplitude of ultrasonic vibrations as well as the initial temperature of milk on the diameter of the evaporated particles, the evaporation rate, the diameter of the powder produced and the time required for the evaporated droplets to dry by ultrasonic method was investigated.

Keywords: Atomization, Oscillation amplitude, Oscillation frequency, Spray drying, Ultrasonic

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 1, Mar- Apr 2023, p. 145-168

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۲ ص. ۱۶۸-۱۴۵

مقاله پژوهشی

مدلسازی فرآیند اتمیزاسیون التراسونیک شیر و تولید پودر شیر به روش خشک کردن پاششی

علی حیدری[1*]- مسعود گوهری منش[2]- محمدرضا قریب[3]- علی کوچی[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

چکیده

استفاده از سیستم‌های التراسونیک در بسیاری از مسائل کاربردی اثبات شده است. از جمله آنها اتمیزاسیون التراسونیک بوده که در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی و پوشش‌دهی کاربرد فراوانی دارد. در پژوهش پیش رو، ابتدا به مرور کارهای انجام شده در این زمینه پرداخته شده و پس از آن با استفاده از روابط ارائه شده برای اتمیزاسیون سیالات مختلف در مقالات بررسی شده، به بررسی تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر اتمیزاسیون و تبخیر شیر به عنوان یک ماده غذایی پرداخته و فرآیند خشک شدن آن به روش خشک کن پاششی پیش‌بینی گردید. سپس به بررسی اثر پارامترهای مختلف نوسان از جمله فرکانس، دامنه و همچنین دمای سیال بر نرخ اتمیزه شدن سیال پرداخته شد. نتایج مدلسازی نشان داد که با افزایش دامنه ارتعاشات، زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک کاهش یافته و همچنین قطر پودر تولید شده، قطر ذرات تبخیر شده و نرخ تبخیر به روش التراسونیک افزایش یافت. بطوری‌که ۴ برابر شدن دامنه ارتعاشات باعث کاهش ۱۴,۴ درصدی زمان لازم برای خشک شدن قطرات و افزایش ۶۲٫۶ درصدی نرخ تبخیر شد. همچنین با مدلسازی فرآیند مشخص شد که با افزایش فرکانس ارتعاشات، زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک افزایش یافت. بطوری‌که در یک دمای ثابت گاز خشک کن و دمای ثابت شیر تغییر فرکانس از ۱۰ به ۴۰ کیلو هرتز منجر به افزایش ۲۱,۴ درصدی زمان لازم برای خشک شدن قطرات شد. همچنین با افزایش دمای شیر از ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، در یک فرکانس و دامنه ارتعاشات ثابت، زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده ۱۲,۴ درصد کاهش و قطر ذرات تولید شده ۱۱,۳. درصد افزایش داشت.

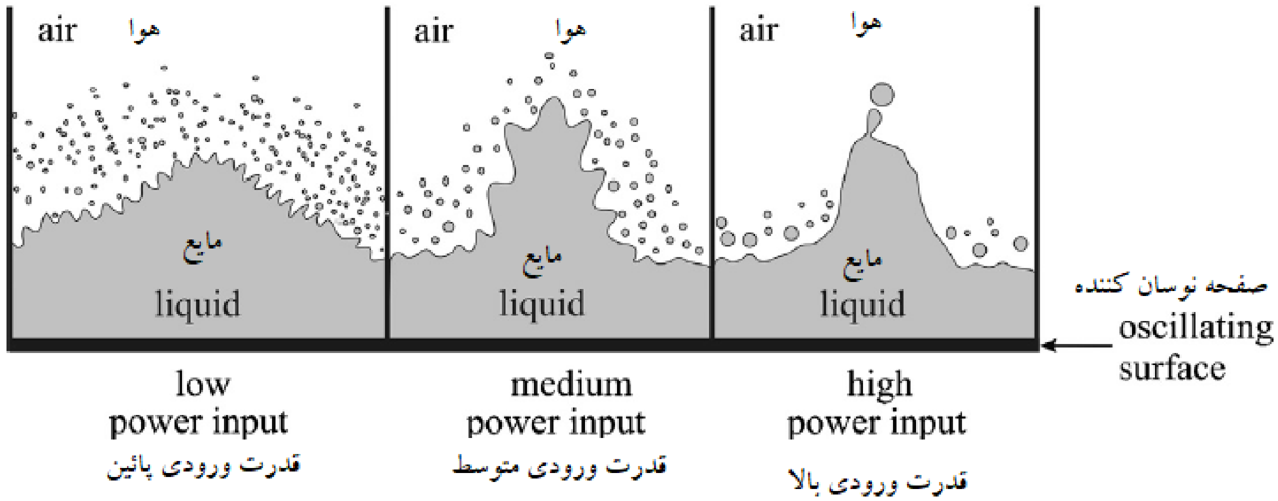
واژه‌های کلیدی: اتمیزاسیون، التراسونیک، دامنه نوسان، فرکانس نوسان، خشک کردن پاششی

مقدمه

ارتعاشات التراسونیک[5] مایعات می‌تواند آنها را به قطرات بسیار ریزی تبدیل کند که به این فرآیند، اتمیزه‌شدن[6] سیال گفته می‌شود. در حین فرآیند اتمیزه‌شدن سیال، اندازه قطرات و توزیع آنها را می‌توان دقیقاً کنترل کرد به طوری‌که قطرات بسیار کوچک شوند. بنابراین توزیع ذرات با سطح تماس بالا با هوا ایجاد شده تا قطرات بتوانند به راحتی تبخیر شوند. این روش در صنایع مختلف از جمله در صنایع غذایی برای تولید پودر خشک محصولات و همچنین در صنعت پوشش‌دهی کاربرد فراوانی دارد. عامل کلیدی که بر اندازه قطره تأثیر می‌گذارد، فرکانس و دامنه ارتعاشات اولتراسونیک است. یکی دیگر از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر پاشش التراسونیک، خصوصیات سیال ازجمله لزجت و کشش سطحی سیال است. مکانیزم‌های مختلف شکل‌گیری قطرات تحت ارتعاشات التراسونیک در شکل ۱ مشاهده می‌شود. (Broniarz-Press *et al.*, 2015)

۱، ۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب استادیاران، دانشیار و استادیار گروه مکانیک، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: a.heydary@torbath.ac.ir
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2022.75615.1154

5- Ultrasonic
6- Atomization



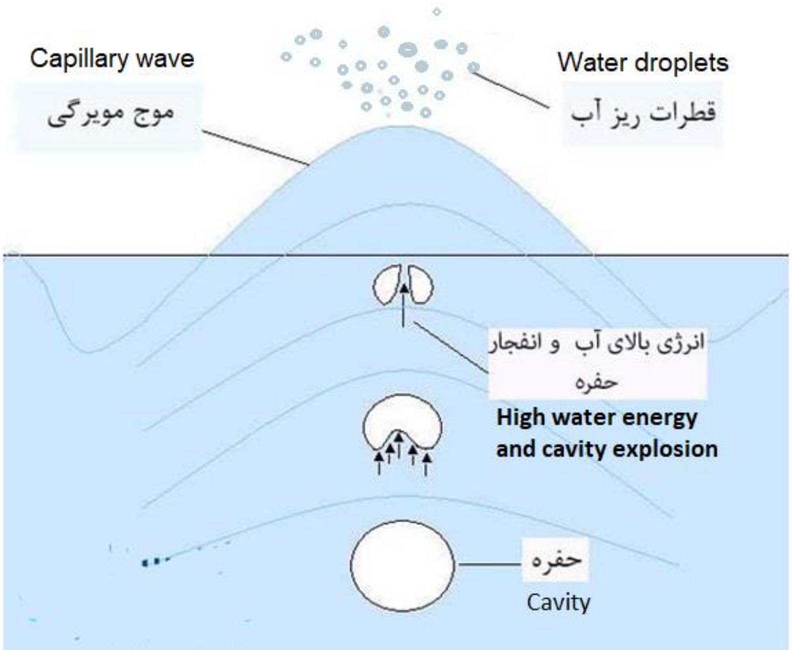
شکل ۱- مکانیزم‌های مختلف شکل‌گیری بخار سیال بر اساس قدرت التراسونیک ورودی (Broniarz-Press *et al.*, 2015)

Fig. 1- Different mechanisms of fluid vapor formation based on the input ultrasonic power (Broniarz-Press *et al.*, 2015)

در مورد مایعات خالص فقط خواص فیزیکی بر اتمیزاسیون تأثیر گذار است. اما در محلول‌ها، سایز ذرات جامد و غلظت محلول نیز بر فرآیند اتمیزاسیون تأثیر گذار است. در محلول‌ها سایز ذرات جامد حل شده باید بسیار کوچکتر از اندازه قطر قطرات مایع باشد. در غیر اینصورت اتمیزاسیون باعث جداشدن جامد و مایع می‌شود. ضمناً غلظت مواد جامد محلول در مایع نباید بیشتر از ۴۰ درصد باشد (Lisboa *et al.*, 2018). فرآیند خشک کردن با خشک‌کن پاششی عبارت است از تبدیل خوراک از حالت مایع (محلول و سوسپانسیون) به ذرات خشک جامد. این فرآیند توسط اسپری کردن محلول در محیطی که گرمای لازم جهت خشک کردن با استفاده از هوای گرم تامین شده است، انجام می‌گیرد. این سیستم یک فرآیند مدام و پیوسته است و خوراک مورد نظر می‌تواند محلول و یا حتی خمیر یا دوغاب باشد. بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خوراک، محصول به دست آمده پودری متشکل از ذرات منفرد و ذرات به هم پیوسته است. مهمترین ویژگی پودر به دست آمده یکنواختی ذرات آن می‌باشد که باعث به وجود آمدن خصوصیاتی نظیر روان بودن، افزایش سرعت حلالیت، مخلوط شدن آسان با دیگر مواد و همچنین سهولت انجام عملیات بعدی بر روی آن می‌شود. خشک کردن با خشک‌کن‌های پاششی یکی از روش های کارآمد و جدید جهت خشک کردن محلول هاست از خشک کن پاششی به صورت وسیع برای خشک کردن محلول ها، سوسپانسیون ها، امولسیون ها و خمیرها در صنایع غذایی، شیمیایی، داروسازی، سرامیک و غیره استفاده می گردد (Samborska *et al.* 2022).

تکنولوژی التراسونیک متشکل از یک دیسک سرامیکی پیزوالکتریک است. سرامیک به دلیل پیزوالکتریک بودن در حضور جریان الکتریکی در فرکانس التراسونیک (که در این فرکانس دیگر صدای موج ایجاد شده در آب شنیده نمی‌شود) نوسان می‌کند و منجر به نوسان آب می‌شود. آب هم تلاش می‌کند تا نوسان فرکانس بالای صفحات را دنبال کند. اما به دلیل اینرسی جرم و وزن نسبی نمی‌تواند در همان فرکانس نوسان کند و موج آب با تاخیر در پشت موج دیسک حرکت می‌کند. در نتیجه یک منطقه کم فشار بین آن‌ها ایجاد می‌شود که یک حفره را شکل می‌دهد. حفره می‌تواند خلاء باشد و یا از هوا پر شود. زیرا در آب هوای محلول نیز وجود دارد که با ایجاد ناحیه کم فشار به سمت حفره حرکت می‌کند. این حفره وقتی منفجر می‌شود انرژی زیادی ایجاد می‌کند (Briceño-Gutierrez *et al.* 2015). این مکانیزم در شکل ۲ آمده است.

تقریبا از سال ۲۰۰۰ تحقیقات در زمینه اتمیزه کننده‌های التراسونیک در جهان به طور جدی آغاز شده و تاکنون پیشرفت‌های مهمی داشته است. اغلب کارهای انجام شده با رویکرد استفاده در خشک‌کن‌های پاششی انجام شده است اما در یکی از تحقیقات انجام شده از اتمیزاسیون التراسونیک برای غنی‌سازی اتانول با افزودن نمک‌های مختلف به آن استفاده شده است (Koumei *et al.*, 2009, Kirpalani *et al.*, 2011). تمبلی و همکاران (Tembely *et al.*, 2011) در یک کار تجربی و تحلیلی بر روی مدلی جدید از اتمیزه کننده التراسونیک که میزان اسپری بر اساس مصرف تنظیم می‌شود، مدلی جدید برای تقریب و ارزیابی سایز قطرات پاشش شده ارائه دادند. در این تحقیق نشان داده شده است که مدل پویا نسبت به شرایط کاری و خصوصیات فیزیکی سیال حساس است.



شکل ۲- نحوه تولید بخار توسط ارتعاشات التراسونیک
Fig. 2- Steam production due to ultrasonic vibrations

در کاربردی دیگر می‌توان از اتمیزاسیون التراسونیک در خشک‌کن‌های سرمایشی استفاده کرد. دیآدیو و همکاران (D'Addio *et al.*, 2012) نشان دادند که در اندازه پودر تولید شده در این روش غلظت ماده جامد حل شده بی‌تأثیر بوده و فقط اندازه قطره تولید شده موثر است. همچنین تاتار توران و همکاران (Tatar Turan *et al.*, 2015) در کاری دیگر تولید پودر میکروکپسوله از ترکیبات زیست فعال بلوبری را توسط خشک‌کن سرمایشی انجام دادند که در آن عملکرد نازل‌های التراسونیک با نازل‌های معمولی مقایسه شده است. در یک پژوهش دیگر ایزروغلو و همکاران (Isleroglu *et al.*, 2018) در مورد خشک‌کن‌های سرمایشی با نازل التراسونیک به افزایش خلوص یک داروی خاص با این روش پرداخته‌اند، بطوری که اثر فرکانس التراسونیک و دبی جریان بر میزان فعالیت آنزیم و اندازه ذرات تشکیل شده بررسی شده است. جهت تولید پودر بلوبری کار دیگری نیز انجام شد که از خشک‌کن پاششی استفاده شده و محصول تولید شده با روش خشک‌کن تحت خلاء مقایسه شد (Candia-Muñoz *et al.*, 2015). در یک تحلیل عددی نیز پاشش التراسونیک در یک خشک‌کن پاششی شبیه‌سازی شد که همخوانی خوبی با نتایج تجربی داشت (Lebedev *et al.*, 2017).

در پژوهشی دیگر به کمک نوسانات التراسونیک پس از جریان یافتن آلیاژ SAC ۳۰۵ (قلع(Sn)-نقره (Ag)-مس (Cu)) بصورت مذاب بر روی گوه ارتعاشی ذرات ریز مذاب از روی سطح بلند شده و در هوای سرد اطراف به صورت پودر فلز در آمدند. نتایج نشان داد، در این فرایند افزایش دمای مذاب به عنوان کاهنده لزجت و کشش سطحی مایع می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در تعیین اندازه قطرات جدا شده و سایز پودر تولید شده داشته باشد (Wisutmethangoon *et al.*, 2011). در پژوهشی دیگر رامیستی و همکاران (Ramisetty *et al.*, 2013) با یک آنالیز تصویری به بررسی توزیع ذرات پخش شده به روش اتمیزاسیون التراسونیک پرداختند که در آن تاثیر فرکانس کاری و مشخصات سیال از جمله دبی جریان سیال بررسی شد. از دیگر کاربردهای اتمیزاسیون التراسونیک رطوبت‌گیری از هوای مرطوب بوده به طوری که بوسیله این سیستم، سیال جاذب رطوبت مانند بروماید لیتیم یا آمونیاک، اتمیزه شده و در جریان هوای مرطوب پاشش می‌شود. به علت افزایش سطح تماس سیال جاذب رطوبت و هوای مرطوب راندمان جذب رطوبت بسیار افزایش می‌یابد. (Yang *et al.* 2014, 2015, 2016; Zhang *et al.*, 2017 ; Arun *et al.*; Li *et al.*, 2018). اتمیزاسیون محلول‌های پلیمری نیز می‌تواند توسط این روش انجام شود و نشان داده شده است که افزایش ویسکوزیته محلول، باعث جلوگیری از شکل‌گیری قطرات ریزتر می‌شود. از طرف دیگر کاهش کشش سطحی در محلول منجر به تولید قطرات ریزتر می‌شود (Kim *et al.*, 2015).

تحقیقات پژوهشی دیگری نیز در زمینه تاثیر پارامترهای نوسان و خواص فیزیکی سیال بر اتمیزاسیون التراسونیک انجام شده است. در یک پژوهش تاثیر ویسکوزیته برشی و کششی سیال نیوتنی و غیر-یوتنی بر اتمیزاسیون التراسونیک آنها بررسی شد و نشان داده شد که تاثیر زیادی بر فرآیند اتمیزاسیون التراسونیک آنها دارد (Broniarz-Press et al., 2015). کیم و همکاران (Kim et al. 2015) در یک پژوهش تجربی دیگر، تأثیر فرکانسهای مختلف نوسان بر اندازه ذرات رطوبت تولید شده به کمک اتمیزه کننده التراسونیک را بررسی کردند و رابطهای بین سایز ذرات تولید شده و فرکانس نوسان ارائه دادند. در یک پژوهش تئوری- تجربی توسط بریسنو گوترش و همکاران (Briceño-Gutierrez et al., 2015). تحلیل تئوری جهت پیش‌بینی رفتار سیال در اتمیزاسیون التراسونیک ارائه شد که در مقایسه با نتایج تجربی نشان داد در این تحلیل، تا فرکانس ۲۲ kHz نتایج با هم همخوانی داشت و در فرکانس‌های بالاتر این تحلیل تئوری با نتایج تجربی انحراف پیدا کرد. دینامیک قطرات اتمیزه شده نیز چالش مهمی است که توسط دیپو و همکاران (Deepu et al., 2018) مورد بررسی قرار گرفت و رژیم‌های مختلف در زمان‌های مختلف اتمیزاسیون یک سیال به صورت تجربی ارائه شد. نتایج نشان داد که که دینامیک اتمیزاسیون وابسته به برهم‌کنش بین مکانیسم تجزیه موج مویینگی و تعادل بین نیروهای اینرسی و لزجتی سیال است. در آخرین تحقیقات انجام شده در این زمینه ضیایی و همکاران Ziaee et al., 2020)) یک رویکرد منطقی برای خشک کردن اسپری بیوداروها با در نظر گرفتن تولید حرارت از نازل اولتراسونیک بدست آوردند و نشان دادند تولید حرارت از نازل اولتراسونیک برای خشک کردن اسپری لیزوزیم[1] مضر است. همچنین گراسمیجر و همکاران (Grasmeijer et al., 2019) به شناسایی مراحل حیاتی پایداری پروتئین در طول خشک کردن اسپری با استفاده از دو نوع نازل مختلف التراسونیک و دو سیالی پرداختند. آنها نشان دادند نوع و پیکربندی نازل مورد استفاده برای خشک کردن اسپری، تعیین‌کننده‌های مهمی برای حفظ پایداری پروتئین هستند، و امکان خنک کردن نازل دو سیال مزیت مهمی نسبت به نازل التراسونیک در فرآیند خشک کردن با اسپری پروتئین‌ها دارد. اما نازل التراسونیک منجر به هزینه اولیه کمتری برای ساخت دستگاه خشک کن اسپری می‌شود. در یک مقاله مروری نایدو و همکاران (Naidu et al., 2022) به بررسی کاربردهای جدید اتمیزه کردن اولتراسونیک در ساخت مواد شیمیایی ریز، داروسازی و تجهیزات پزشکی پرداخته‌اند. با توجه به نتایج آنها استفاده از امواج التراسونیک در کاربردهای اتمیزه کردن مزایای قابل توجهی مانند نیاز به انرژی کم، تولید بدون ضایعات، صرفه‌جویی در مواد را نشان می دهد. این ویژگی‌ها مهر تأییدی بر سازگاری این روش با محیط زیست است.

با توجه به مرور انجام شده بر روی تحقیقات گذشته مشخص گردید که مدلسازی روش التراسونیک برای خشک‌کن‌های پاششی و تولید پودر شیر تاکنون انجام نشده است. لذا در پژوهش حاضر، پس از پیدا کردن معادلات حاکم بر مسئله، به بررسی تأثیر شرایط نوسانات التراسونیک از جمله فرکانس و دامنه ارتعاشات و همچنین دمای سیال بر قطر ذرات تبخیر شده، نرخ تبخیر، قطر پودر بدست آمده و زمان لازم برای خشک شدن قطرات پرداخته می‌شود. بدین منظور معادلات حاکم بر مسئله توسط نرم‌افزار MATHLAB نوشته شده و با بکار بردن فرضیات مناسب در سه حالت شبیه سازی انجام می‌شود. متغیرهای مستقل مسئله شامل فرکانس و دامنه نوسان و همچنین دمای شیر است که در حالت اول در یک دامنه نوسان و دمای شیر ثابت مقدار فرکانس نوسان چهار برابر می‌شود. در حالت دوم در یک فرکانس نوسان و دمای شیر ثابت دامنه نوسان چهار برابر می‌شود و در حالت آخر در یک فرکانس و دامنه نوسان ثابت دمای شیر دو برابر می‌شود.

روش تحلیل مسئله

معادلات مدلسازی تبخیر التراسونیک

مطالعات مربوط به اتمیزاسیون بر روی سطوح ارتعاشی به سال 1830 برمی‌گردد، زمانی که فارادی (Faraday, 1831) کشف کرد که دوره امواج ارتعاشی که بر روی یک لایه مایع روی سطح ارتعاشی تشکیل می‌شود، دو برابر دوره ارتعاش محرک است. رایلی (Rayleigh, 1833) یک رابطه بر اساس طول موج مویرگی، فرکانس ارتعاش، کشش سطحی مایع معرفی کرد و نشان داد که کشش سطحی یک مایع را می‌توان از روی طول موج مویرگی مشاهده شده بر روی سطح مایع ارتعاشی تعیین کرد. بعداً، لانگ (Lang, 1962) میانگین قطر قطرات تولید شده از تاج امواج مویرگی را برای سیالات کاری مختلف از جمله آب، روغن و موم‌های مذاب در فرکانس‌های ارتعاش اجباری ۱۰ تا ۸۰۰ کیلوهرتز پیش‌بینی کرد و و یک رابطه بین قطر متوسط قطرات پرتاب شده (D) و طول موج مویرگی (λ) که با معادله زیر نشان داده شده است ارائه کرد:

$$D_{droplet} = 0.34\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right) \quad (۱)$$

که در آن σ کشش سطحی و f فرکانس تحریک است. پسکین و همکاران (Peskin et al., 1963) وابستگی متوسط قطر قطرات را به دامنه ارتعاش اجباری و ضخامت لایه مایع موجود در سطح ارتعاشی

1- lysozyme

مطالعه کردند و رابطه زیر را برای پیش بینی قطر قطرات تولید شده ارائه دادند:

$$\frac{D_{droplet}}{\pi A_m} = \left[\left(\frac{2\sigma}{\rho \omega_0^2 {A_m}^3}\right) 2\tanh\left(\frac{\pi A_m}{d_p}\right)\left(\frac{l}{A_m}\right)\right]^{\frac{1}{3}} \quad (۲)$$

که در آن ω_0 فرکانس نوسان نوک اتمایزر، A_m دامنه نوک و l ضخامت فیلم مایع است. راجان و همکاران (Rajan *et al.*, 2001) یک رابطه بر اساس اعداد بدون بعد مانند عدد وبر (N_{We})، عدد اونسورج (N_{oh}) و عدد شدت (N_{in}) پیشنهاد کردند:

$$D_{droplet} = \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{\frac{1}{3}} \times [1 + A(N_{We})^{0.22}(N_{Oh})^{0.166}(N_{In})^{-0.0277}] \quad (۳)$$

$$N_{We} = \frac{fQ\rho}{\sigma} \quad (۴)$$

$$N_{Oh} = \frac{\mu}{\rho {A_m}^2 f} \quad (۵)$$

$$N_{In} = \frac{f^2 {A_m}^4}{CQ} \quad (۶)$$

که در روابط فوق Q و C به ترتیب سرعت جریان حجمی و سرعت صوت در محیط مایع است. رامیستی و همکاران (Ramisetty *et al.*, 2013) با اعمال یک سری آزمایشات تجربی به روابط زیر رسیدند:

$$D_{droplet} = 0.0015\left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left[1 + \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{-0.2}(N_{We})^{0.154}(N_{Oh})^{-0.11}(N_{In})^{-0.033}\right] \quad (۷)$$

معادله فوق برای محدوده متغیرها به صورت زیر صادق بوده و دقت آن $R^2=0.91$ است.

f = 20–130 kHz, ρ = 912–1151 kg/m^3,
σ = 0.029– 0.073 N/m,
Oh = 2.71–161.64, *We* = 14.8–571,
In = 3.65 × 10^{-13}–1.92 ×10^{-09}

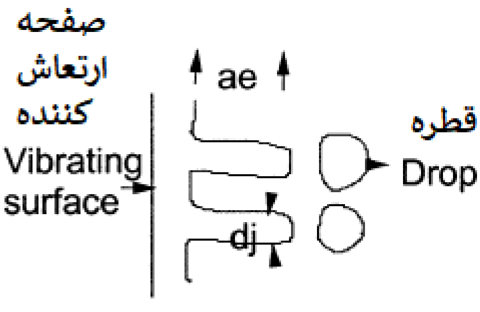
لازم به توضیح است که برای اینکه مایع با استفاده از ارتعاشات التراسونیک به قطرات ریز شکسته شود، لازم است که دامنه ارتعاشات نیز از یک مقدار آستانه بیشتر باشد. این مقدار آستانه از رابطه زیر بدست می‌آید (Rajan *et al.*, 2001).

$$A_{m_{crit}} = \frac{2\mu}{\rho}\left(\frac{\rho}{\pi\sigma f}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۸)$$

اگر دامنه ارتعاشات زیر این مقدار باشد اتمیزاسیونی اتفاق نمی‌افتد و روابط فوق هیچ کدام صادق نیست. به عنوان مثال دامنه ارتعاش بحرانی برای مایع مذاب آلومینیوم ۴۰ میکرون برآورد شده است. اگر نرخ جریان مایع کمتر از Q_{cri} باشد، باید با حذف عدد وبر اصلاح شده، روابط محدود شود.

$$Q_{crit} = \frac{\sigma}{f\rho} \quad (۹)$$

این حداقل نرخ جریانی است که برای مقادیر بیش از آن، تأثیر نرخ جریان توسط روابط ارائه شده پیش‌بینی می‌شود. حداکثر نرخ جریان برای این روابط که قابل اعمال است، نرخ جابجایی حجمی سطح ارتعاشی است که از حاصل ضرب فرکانس، دامنه و مساحت سطح ارتعاشی به دست می‌آید. هنگامی که سرعت جریان مایع از نرخ جابجایی بیشتر شود، در اثر گرانش چکه می‌کند و قطرات بزرگ‌تری ایجاد می‌شود.



شکل ۳- ارتباط بین قطرات جدا شده و قطر جت امواج مویرگی (Rajan *et al.*, 2001)

Fig. 3- Relation between separated droplets and capillary wave jet diameter (Rajan *et al.*, 2001)

ارتباط بین d_j (قطر جت امواج مویرگی) و d_p (قطر قطرات ایجاد شده) که در شکل ۳ نشان داده شده است توسط رایلی و والزل[1] به صورت زیر ارائه شده است (Walze 1993; Rajan *et al.*, 2001):

$$Rayleigh \longrightarrow d_j = 0.53 D_{droplet} \quad (۱۰)$$

$$Walzel \longrightarrow d_j = \frac{D_{droplet}}{1.68\left[2 + 0.6\frac{\mu}{\rho f A_m^2}\right]^{\frac{1}{6}}} \quad (۱۱)$$

با توجه به روابط فوق، مقدار نرخ جریان حجمی قطرات خارج شده از مایع توسط ارتعاشات التراسونیک تابعی از فرکانس و دامنه ارتعاش و چگالی، کشش سطحی و لزجت سیال به صورت زیر تعریف می‌شود (Rajan *et al.*, 2001):

$$Q_e = \frac{\frac{\pi}{6} D_{droplet}^3 (f A_m)}{k\left(\frac{\rho f^2}{\pi\sigma}\right)^{0.66}\left(\frac{\pi}{4} d_j^2\right)\frac{2\mu}{\rho}\left(\frac{\rho}{\pi\sigma f}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (۱۲)$$

که در رابطه فوق، برای روابط رایلی و والزل مقدار ثابت k به ترتیب ۰٫۳ و ۰٫۱ می باشد.

معادلات مدلسازی خشک کردن پاششی

پس از آنکه ذرات مایع در اتمایزر التراسونیک به ذرات بخار تبدیل شد، فرآیند خشک‌کردن آغاز می‌شود. قطر نهایی پودر تولید شده (قطره خشک شده) از رابطه زیر بدست می‌آید (Vehring, 2008).

$$D_{particle} \cong D_{droplet} \sqrt[3]{\left(\frac{C}{\rho}\right)_{particle}} \quad (۱۳)$$

همچنین با فرض اشباع بودن جریان خروجی و معلوم بودن دما و رطوبت هوای ورودی می‌توان دمای خروجی و سپس زمان لازم برای تبخیر را بصورت زیر بدست آورد. با فرض یک فرآیند اشباع آدیاباتیک که در شکل زیر نشان داده شده است داریم:

در فرآیند نشان داده شده در شکل ۴ با داشتن دبی جریان تبخیر شده و غلظت مایع ورودی می‌توان جرم بخار آب اضافه شده به جریان را بدست آورد. با داشتن دمای حباب خشک ورودی و رطوبت نسبی هوای ورودی، مقدار رطوبت مخصوص ورودی قابل محاسبه است. با فرض رطوبت نسبی ۱۰۰٪ در خروجی (فرآیند اشباع آدیاباتیک) می‌توان با نوشتن اصل بقای جرم و اضافه کردن جرم آب تبخیر شده به رطوبت مخصوص ورودی، رطوبت مخصوص خروجی را بصورت زیر بدست آورد:

$$\dot{m}_v = Q_e \times (1 - C) \times \rho_{water} \quad (۱۴)$$

$$\omega_{out} = \omega_{in} + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{dry\ air}} \quad (۱۵)$$

برای ایجاد معادله نرخ تبخیر آب از قطرات محصول، ملاحظاتی لازم است. ابتدا باید در نظر گرفت که سرعت نسبی بین قطره و گاز خشک‌کن را می‌توان نادیده گرفت و در نتیجه مکانیسم تبخیر در گاز راکد رخ می‌دهد، بنابراین عدد ناسلت (Nu) برابر با ۲ است. ثانیا، فقط دوره نرخ تبخیر ثابت در نظر گرفته می‌شود. در طول این دوره، سرعت انقباض قطره را می‌توان با جریان جرمی خروجی از قطره برابر فرض کرد. با داشتن رطوبت مخصوص خروجی می‌توان دمای حباب خشک خروجی را از رابطه ۱۶ بدست آورد و از رابطه ۱۷ نیز زمان فرآیند خشک کردن قطرات بدست آمده از اتمایزر التراسونیک را محاسبه نمود (Lisboa *et al.*, 2018):

$$(C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_{f2} = (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) \quad (۱۶)$$

$$t = \frac{\rho \Delta H_{vap}}{2 \times k_{gas}(T_{db_{out}} - T_{wb})} \times (D_{droplet}^2 - D_{particle}^2) \quad (۱۷)$$

در این رابطه $T_{db_{out}}$ دمای حباب خشک گاز خشک کننده بوده که برابر میانگین دمای حباب خشک ورودی و خروجی در نظر گرفته می‌شود. همچنین T_{wb} دمای حباب تر فرآیند بوده که از رابطه ۱۸ محاسبه خواهد شد (Lisboa *et al.*, 2018). همچنین k_{gas} ضریب رسانش گاز خشک کننده و ΔH_{vap} گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد.

$$T_{wb} = T_{in} + \frac{(\omega_2 - \omega_1)\Delta H_{vap}}{C_p} \quad (۱۸)$$

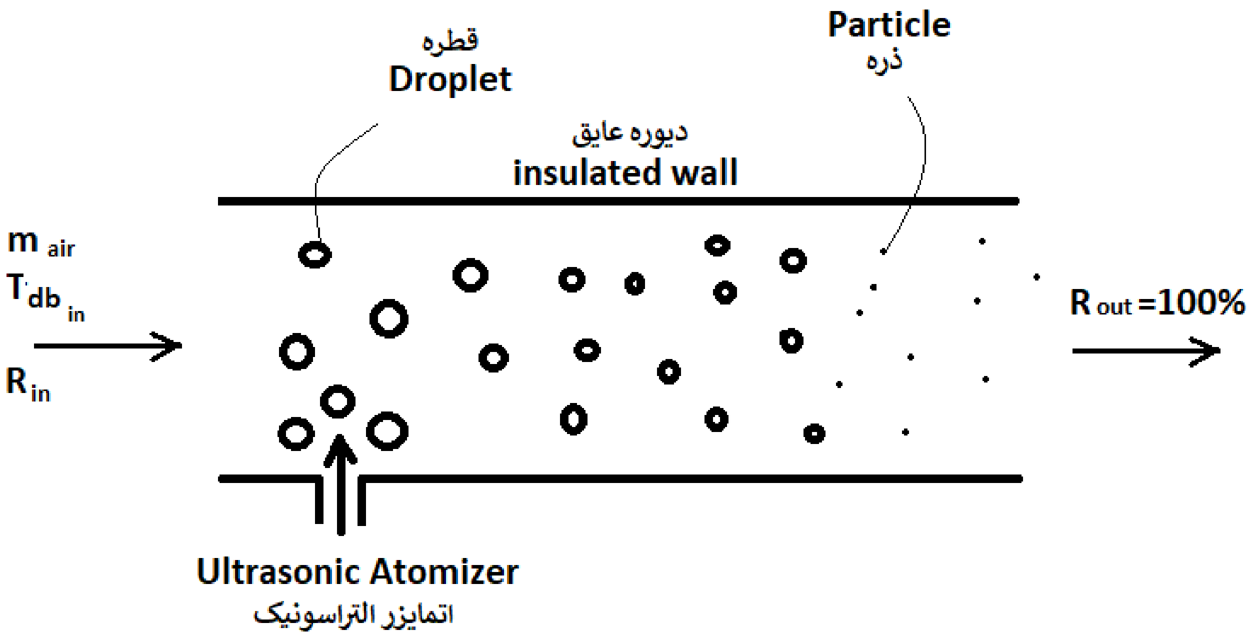
خصوصیات فیزیکی شیر

برای محاسبه ویسکوزیته و چگالی شیر می‌توان از رابطه زیر که توسط بکشی و همکاران (Bakshi *et al.*, 1984) بر حسب دمای شیر و درصد چربی آن ارائه شده است استفاده کرد:

$$\ln(\mu) = \frac{2721.5}{T} + 0.1F - 8.9 \quad (۱۹)$$

$$\rho = 0.3T - 0.03T^2 - 0.7F - 0.01F^2 + 1034.5 \quad (۲۰)$$

1- Walzel



شکل ۴- فرآیند خشک کردن قطرات بدست آمده از اتمایزر التراسونیک (اشباع آدیاباتیک)
Fig. 4- Drying process of droplets obtained from ultrasonic atomizer (adiabatic saturation)

که در این رابطه T دمای شیر بر حسب کلوین و F درصد چربی شیر می‌باشد و لزجت بدست آمده برحسب سانتی پوز و چگالی بدست آمده برحسب کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود. برای سه نوع شیرمختلف ۱) شیر بدون چربی، ۲) شیر هموژنایز شده، ۳) شیرکامل، به ترتیب سه رابطه زیر برای محاسبه کشش سطحی شیر توسط واتسون (Watson 1965) ارائه شده است:

$$\sigma = 74.25 - 0.5941T + 0.003185T^2 \quad (۲۱)$$

$$\sigma = 76.73 - 0.7054T + 0.003574T^2 \quad (۲۲)$$

$$\sigma = 77.92 - 0.7953T + 0.004004T^2 \quad (۲۳)$$

در این رابطه دما بر حسب $^{\circ}F$ جایگذاری شده و σ کشش سطحی شیر بر حسب $\frac{dynes}{cm}$ بدست می‌آید.

فرضیات و شرایط مرزی جریان خشک سازی

پس از مدلسازی فرآیند اتمیزاسیون التراسونیک شیر، فرآیند خشک‌سازی آن آغاز خواهد شد. فرآیند خشک‌سازی در این مسئله مطابق شکل ۴ بصورت یک فرآیند اشباع آدیاباتیک فرض می‌شود که شرایط زیر در آن برقرار است.

- در صورت استفاده از ذرات حل شده جامد در مایع، سایز آنها باید بسیار کوچکتر از قطرات ایجاد شده باشد و غلظت آن در مایع بیشتر از ۴۰ درصد نباشد.
- در محاسبات فرض می‌شود بخار اطراف مایع حالت اشباع داشته باشد.
- فرض می‌شود فرآیند اتمیزه شدن از زمان دیده شدن اغتشاشات سطح شروع و تا هنگام دیدن آخرین ذرات بخار ادامه داشته باشد.
- دیواره‌های کانال تبخیر کاملاً عایق فرض شده و اتلاف حرارتی به خارج از سیستم نداریم.
- فرآیند خشک‌کردن قطرات بخار شیر بوجود آمده بصورت اشباع آدیاباتیک فرض می‌شود.
- دمای هوای خشک‌کننده ورودی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود.
- رطوبت نسبی ورودی ۵٪ فرض می‌شوند که برای دمای ۱۸۰ درجه ماکزیمم مقدار آن حدود ۱۰ درصد است.
- غلظت شیر (مقدار ماده جامد حل شده در آن) ۰/۰۲ gr/ml فرض می‌شود.
- آنتالپی تبخیر شیر معادل آب در دمای ۲۵ درجه و برابر ۲۴۵۰ kj/kg فرض می‌شود.
- ضریب رسانش هوا برابر ۰/۰۲۵ W/mK فرض می‌شود.
- چگالی پودر شیر برابر ۱/۳ g/cm^3 درنظر گرفته می‌شود. (Berlin *et al.*, 1963)

- شیر درنظر گرفته شده شیر کامل با درصد چربی ۳/۲۵ ٪ است.

نحوه مدلسازی و حل مسئله

در کار حاضر ابتدا به بررسی مایعی که محدوده خواص آن در روابط (خصوصاً رابطه ۷) صادق است پرداخته می شود. یکی از پر کاربردترین مایعاتی که در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد شیر است. با بررسی ویسکوزیته، کشش سطحی و چگالی شیر و بدست آوردن اعداد بدون بعد *We*، *In* و *Oh* مشخص می‌شود که برای شیر نیز می‌توان از رابطه ۷ استفاده کرد. پس از محاسبه قطر ذرات تبخیر شده شیر در اثر ارتعاشات التراسونیک و همچنین نرخ تبخیر می‌توان متغیرهای مستقل تحقیق را تغییر داد. ابتدا در خواص فیزیکی ثابت سیال، به تغییر فرکانس و دامنه نوسانات التراسونیک و تأثیر آنها بر قطر ذرات تولیدی و نرخ تبخیر پرداخته می شود. در مرحله بعد با ثابت بودن فرکانس و دامنه نوسانات التراسونیک تاثیر تغییرات خواص سیال (تغییر دما) بر قطر ذرات تولیدی و نرخ تبخیر بررسی می‌شود. در مرحله بعد وارد فرآیند خشک‌سازی پاششی شده و با فرض فرآیند اشباع آدیاباتیک تأثیر فرکانس و دامنه نوسانات التراسونیک و همچنین تغییرات خواص سیال (تغییر دما و درصد چربی شیر) بر قطر پودر تولید شده و زمان لازم برای فرآیند خشک کردن بررسی می‌شود. تمامی مراحل فوق توسط نرم‌افزار MATHLAB انجام می‌شود.

نتایج و بحث

در این بخش به بررسی نتایج مدلسازی پرداخته می شود. بدین صورت که ابتدا تأثیر فرکانس ارتعاشات بر مواردی چون قطر قطرات تولیدی، نرخ تبخیر، قطر پودر تولیدی و زمان خشک شدن قطرات در دماهای مختلف شیر و همچنین دامنه‌های ارتعاشات متفاوت بررسی می‌شود. در قسمت دوم به بررسی تأثیر دامنه ارتعاشات بر مواردی چون قطر قطرات تولیدی، نرخ تبخیر، قطر پودر تولیدی و زمان خشک شدن قطرات در دماهای مختلف شیر و همچنین فرکانس‌های ارتعاشات متفاوت پرداخته می‌شود. برای آنکه اعداد بدون بعد *We*، *In* و *Oh* در محدوده مورد نظر رابطه ۷ (جهت اطمینان از صحت محاسبات) باقی بمانند در دو بخش مجزا به تغییر متغیرها پرداخته می‌شود.

- تغییر فرکانس ارتعاشات از ۱۰ کیلو هرتز به ۴۰ کیلو هرتز در دمای ثابت گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ثابت شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات ثابت برابر ۲ میکرون
- تغییر دامنه ارتعاشات از ۱ میکرون به ۴ میکرون در دمای ثابت گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ثابت شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز

تأثیر فرکانس ارتعاشات

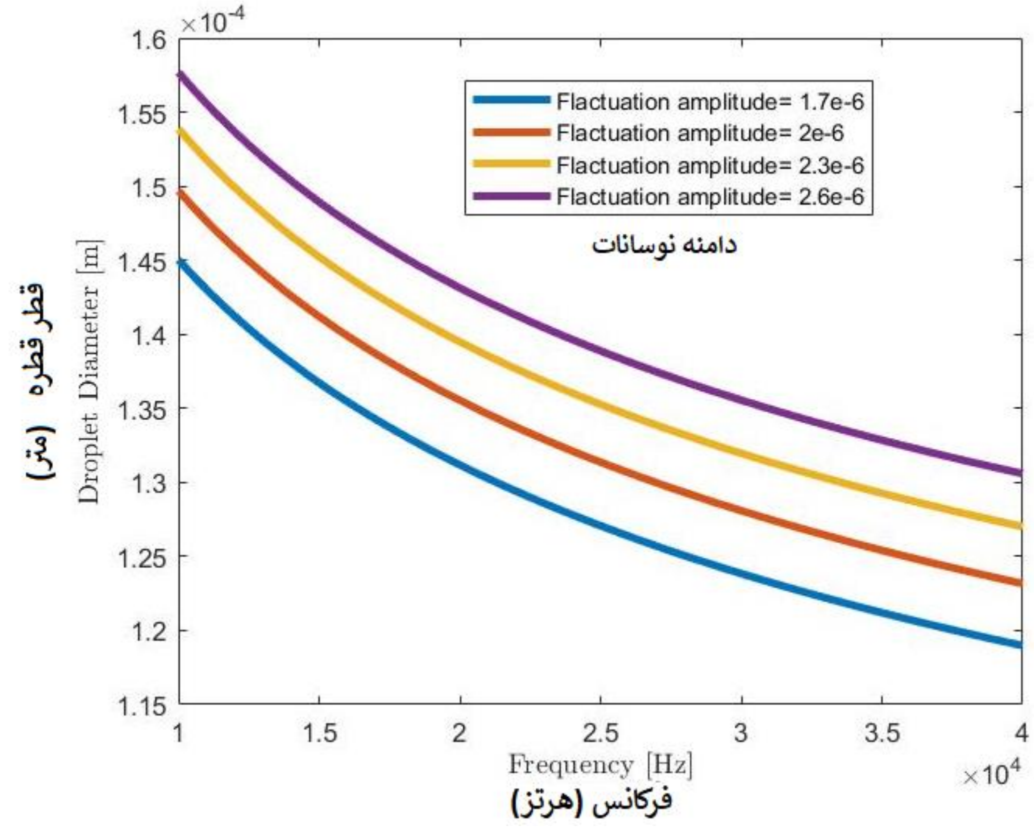
در شکل ۵ تأثیر فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت بر قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات قطر قطرات تولید شده به روش التراسونیک کاهش می‌یابد. بدین صورت که در حالتی که دامنه ارتعاشات ۲ میکرون است، افزایش فرکانس از ۱۰ کیلو هرتز به ۴۰ کیلو هرتز باعث کاهش ۱۸ درصدی قطر ذرات تبخیر شده می‌شود. دلیل آن بر می‌گردد به افزایش سرعت جت ایجاد شده بر روی تاج موج‌های مویرگی و زودتر جدا شدن آنها از سطح مایع که منجر به قطرهای کوچکتر می‌شود. در ضمن در یک فرکانس ثابت با افزایش دامنه ارتعاشات قطر قطرات تولید شده افزایش می‌یابد. بطوری که افزایش ۵۲ درصدی در دامنه ارتعاشات باعث افزایش ۸/۲ درصدی در قطر ذرات تبخیر شده می‌شود. به نظر می‌رسد که با افزایش دامنه ارتعاشات طول جت ایجاد شده از تاج موج‌های مویرگی بیشتر شده و هنگام جدا شدن جت از سطح مایع حجم بیشتری از مایع داخل خود جای داده و منجربه افزایش قطر قطرات ایجاد شده می‌شود.

شکل ۶ قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دمای شیر قطر ذرات تبخیر شده نیز بیشتر می‌شود. بطوری‌که با افزایش دمای شیر از ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد قطر ذرات تولید شده ۱۱/۳ درصد افزایش داشته است. افزایش دما باعث کاهش ویسکوزیته و کشش سطحی سیال شده و این امر منجر به کاهش نیروهای مقاوم به ایجاد قطره و به تبع آن جدا شدن راحت تر قطرات از روی سطح مایع می‌شود.

در شکل ۷ تأثیر فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت بر نرخ تبخیر به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات نرخ تبخیر به روش

التراسونیک کاهش می‌یابد. بدین صورت که در حالتی که دامنه ارتعاشات ۲ میکرون است، افزایش فرکانس از ۱۰ کیلو هرتز به ۴۰ کیلو هرتز باعث کاهش ۴۴ درصدی نرخ تبخیر می‌شود. دلیل آن بر می‌گردد به کاهش قطر ذرات تبخیر شده و به تبع آن کاهش حجم و نرخ تبخیر. شکل ۸ نرخ تبخیر به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک‌کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دمای شیر نرخ تبخیر نیز بیشتر می‌شود. بطوری که با افزایش دمای شیر از ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد نرخ تبخیر ۳۴/۸ درصد افزایش داشته است. دلیل آن کاهش نیروهای ویسکوزیته و کشش سطحی با افزایش دما و تبخیر سطحی راحت‌تر مایع است.

در شکل ۹ تأثیر فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت بر قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک کاهش می‌یابد. بدین صورت که در حالتی که دامنه ارتعاشات ۲ میکرون است، افزایش فرکانس از ۱۰ کیلو هرتز به ۴۰ کیلو هرتز باعث کاهش ۱۷/۲ درصدی قطر پودر تولید شده می‌شود. دلیل آن بر می‌گردد به کاهش قطر ذرات تبخیر شده و به تبع آن کاهش قطر پودر تولید شده. شکل ۱۰ قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دمای شیر قطر پودر تولید شده نیز بیشتر می‌شود. بطوری‌که با افزایش دمای شیر از ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد قطر پودر تولید شده ۱۱٫۵ درصد افزایش داشته است. دلیل آن افزایش قطر ذرات تولید شده با افزایش دمای شیر و به تبع آن افزایش قطر پودر تولید شده می‌باشد.

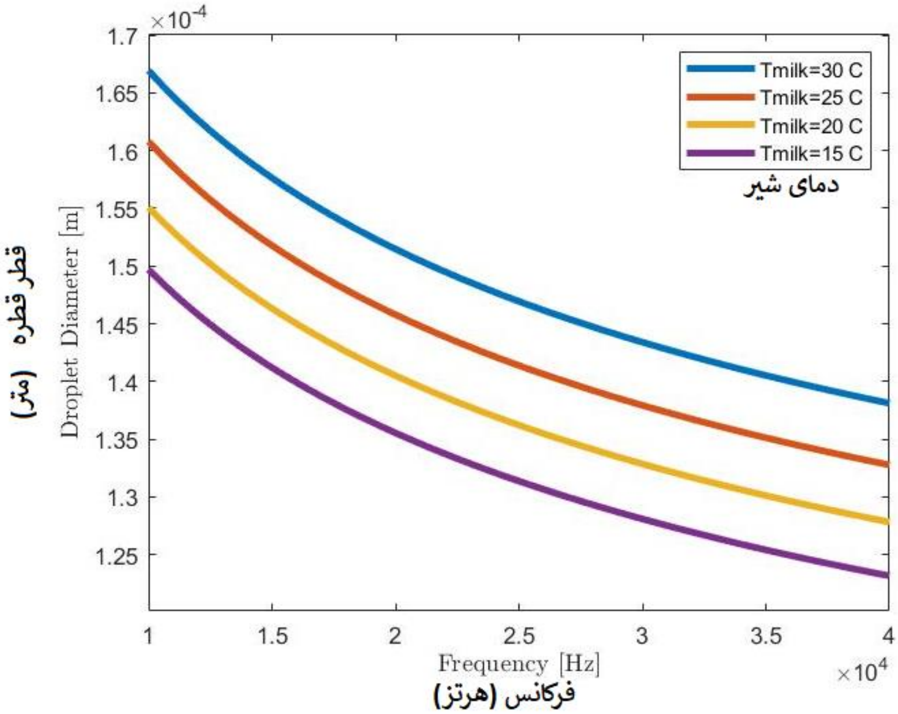


شکل ۵- قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 5- Diameter of ultrasonic evaporated droplets at different frequencies and in different vibration amplitudes

(Dryer gas temperature is 100 ° C and milk temperature is 15 ° C)

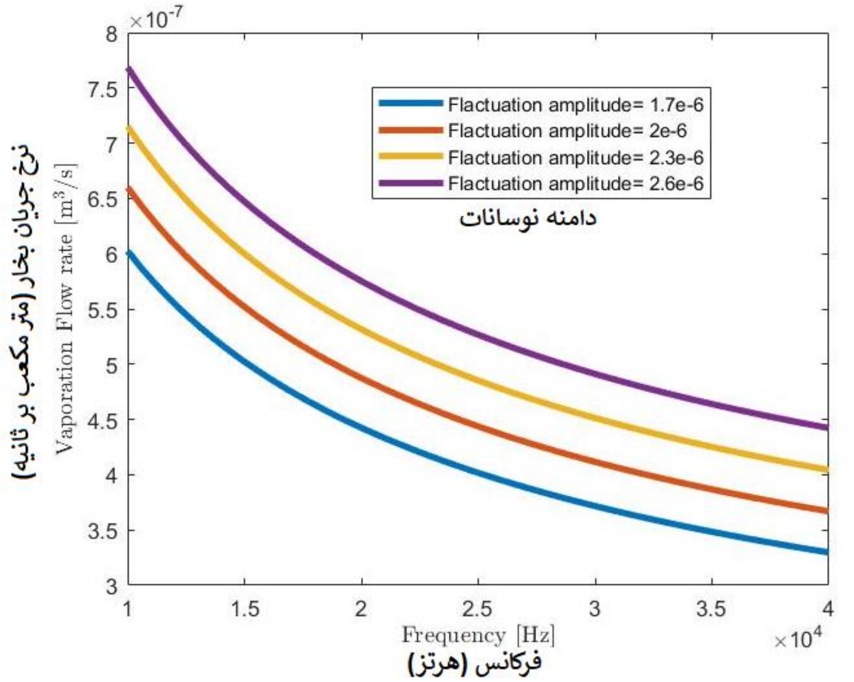


شکل ۶- قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون)

Fig. 6- Diameter of ultrasonic evaporated droplets at different frequencies and at different milk temperatures

(Dryer gas temperature equal to 100 ° C and vibration amplitude equal to 2 microns)

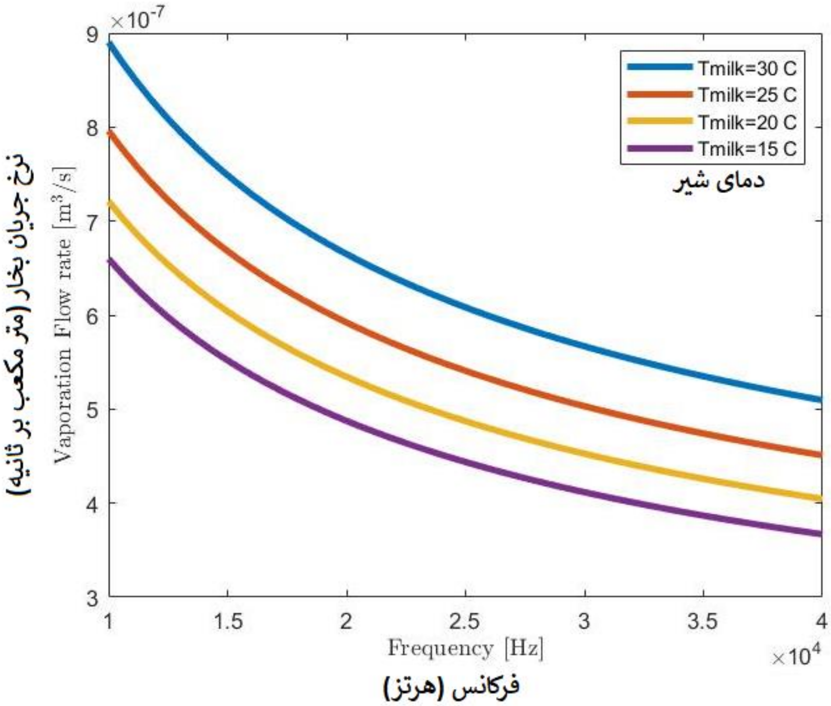


شکل ۷- نرخ تبخیر به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 7- Ultrasonic evaporation rate at different frequencies and in different vibration amplitudes

(Dryer gas temperature is 100 ° C and milk temperature is 15 ° C)

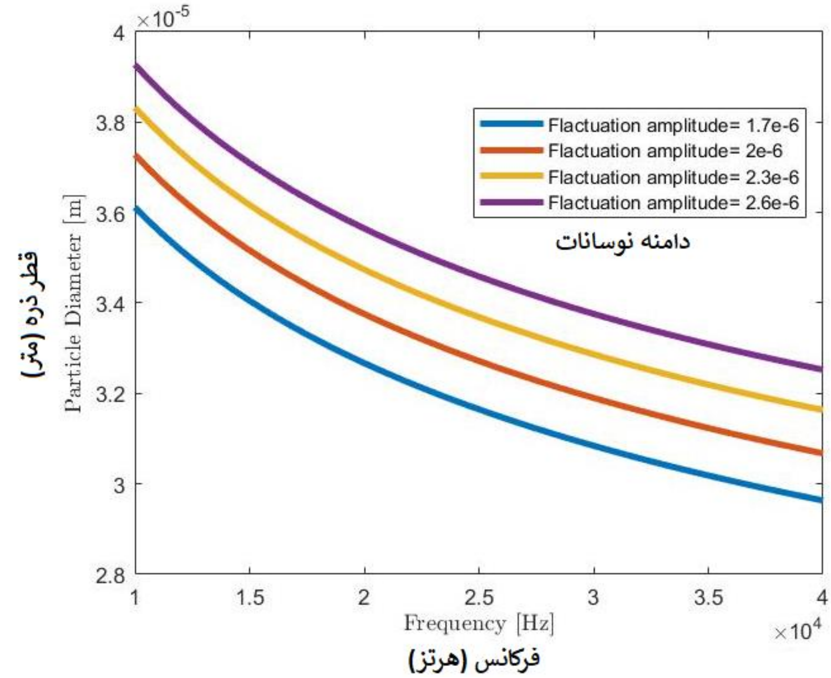


شکل ۸- نرخ تبخیر به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون)

Fig. 8- Ultrasonic evaporation rate at different frequencies and at different milk temperatures

(Dryer gas temperature equals to 100 ° C and vibration amplitude equals to 2 microns)

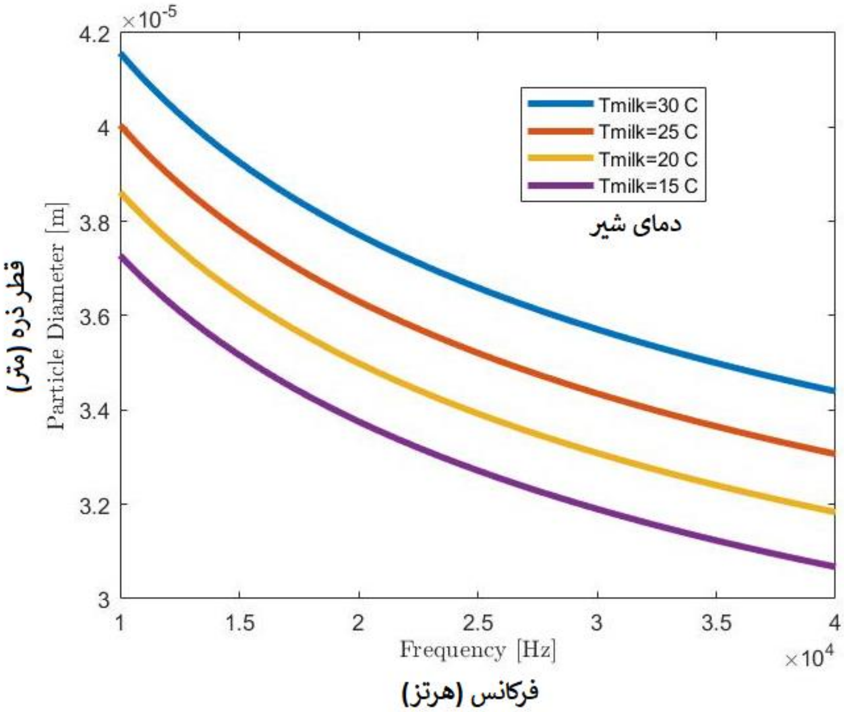


شکل ۹- قطر پودر تولید شده پس از تبخیر به روش التراسونیک و خشک شدن در فرکانس‌های مختلف و در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 9- The diameter of the produced powder after ultrasonic evaporation and drying at different frequencies and in different amplitude vibrations

(Dryer gas temperature is 100 ° C and milk temperature is 15 ° C)



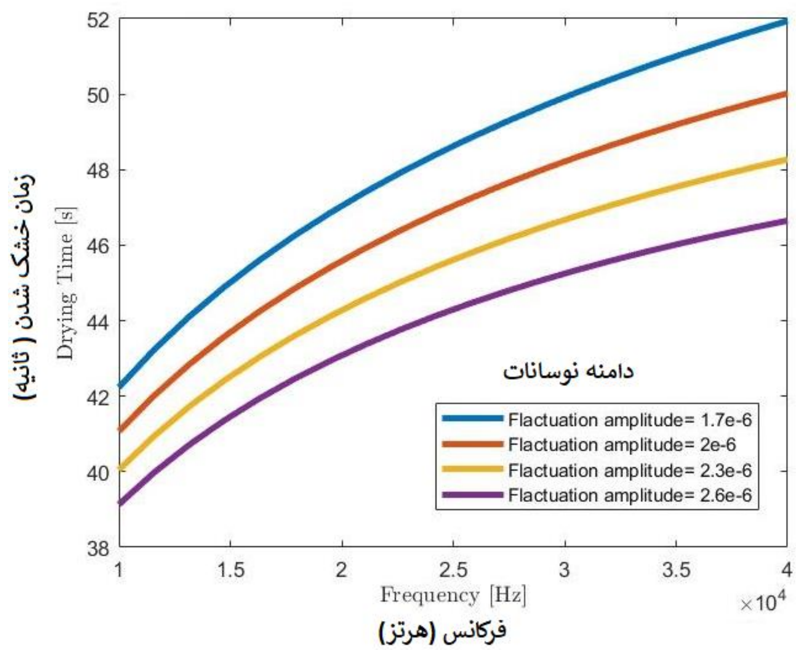
شکل ۱۰- قطر پودر تولید شده پس از تبخیر به روش التراسونیک و خشک شدن در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون)

Fig. 10- The diameter of the produced powder after ultrasonic evaporation and drying at different frequencies and at different milk temperatures

(Drying gas temperature equals to 100 ° C and vibration amplitude equals to 2 microns)

در شکل ۱۱ تأثیر فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت بر زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک‌کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک افزایش می‌یابد. بدین صورت که در حالتی که دامنه ارتعاشات ۲ میکرون است، افزایش فرکانس از ۱۰ کیلو هرتز به ۴۰ کیلو هرتز باعث افزایش ۲۱/۴ درصدی زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده می‌شود. دلیل آن بر می‌گردد به اینکه با افزایش فرکانس نوسان و کاهش نرخ تبخیر مقدار محتوی رطوبت و رطوبت مطلق در خروجی کاهش یافته و طبق روابط ۱۷ و ۱۸ منجر به افزایش T_{wb} و زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده می‌شود. شکل ۱۲ زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک‌کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دمای شیر زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده کاهش می‌یابد. بطوری‌که در فرکانس ۴۰ کیلو هرتز با افزایش دمای شیر از ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی-گراد زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده ۱۲/۴ درصد کاهش داشته است. دلیل آن از دو منظر قابل بررسی است. اولاً افزایش دمای شیر باعث می‌شود اختلاف دمای اولیه مایع و دمای حباب تر کمتر شده و زمان کمتری صرف افزایش دمای مایع برای شروع تبخیر شود. ثانیاً با توجه به اینکه افزایش دمای شیر باعث افزایش نرخ تبخیر و محتوی رطوبت خروجی می‌شود T_{wb} و زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده طبق روابط ۱۷ و ۱۸ کاهش می‌یابد.

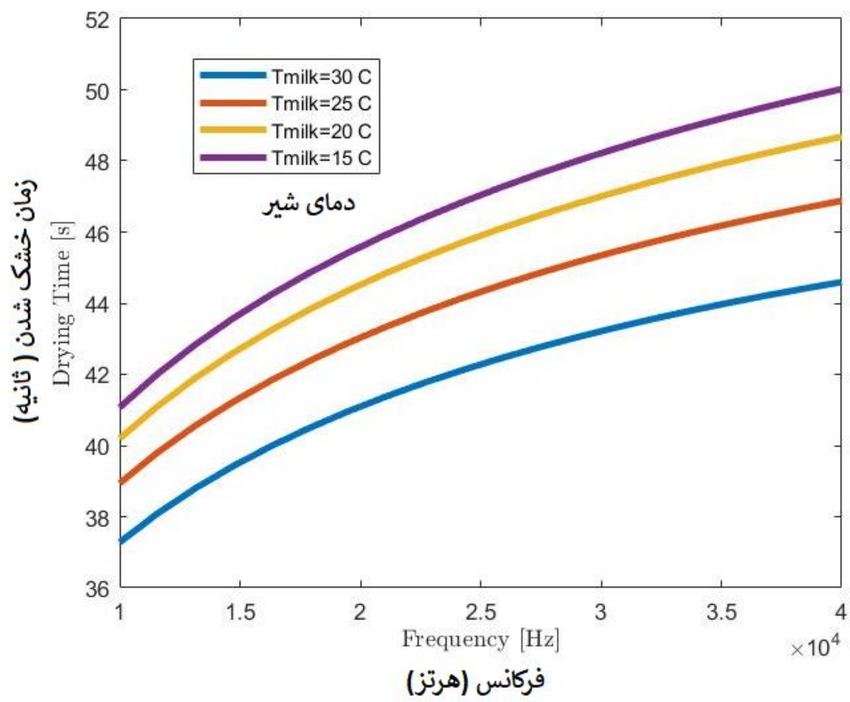


شکل ۱۱- زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۱۵ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 11- Time required for drying the ultrasonic evaporated droplets to dry at different frequencies and in different vibration amplitudes

(Dryer gas temperature of 100 ° C and milk temperature of 15 ° C)



شکل ۱۲- زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دماهای شیر متفاوت

(دامنه ارتعاشات برابر ۲ میکرون و دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)

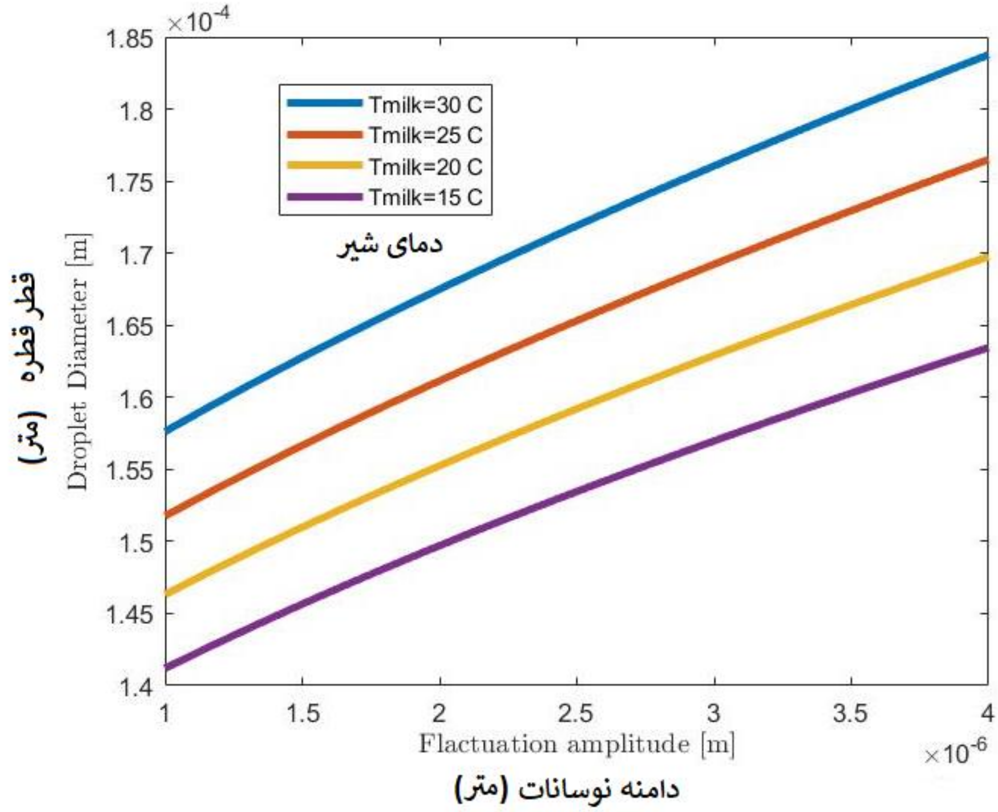
Fig. 12- Time required for drying the ultrasonic evaporated droplets at different frequencies and at different valve temperatures

(Vibration amplitude equals to 2 microns and dryer gas temperature equals to 100 ° C)

تأثیر دامنه ارتعاشات

در شکل ۱۳ تأثیر دامنه ارتعاشات در دماهای شیر متفاوت بر قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دامنه ارتعاشات قطر قطرات تولید شده به روش التراسونیک افزایش می‌یابد. بدین صورت که در دمای شیر ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دامنه ارتعاشات از ۱ میکرون به ۴ میکرون باعث افزایش ۱۵/۸درصدی قطر ذرات تبخیر شده می‌شود. دلیل آن بر می گردد به افزایش طول جت ایجاد شده بر روی تاج موجهای مویرگی و افزایش حجم ذرات جدا شده از سطح که منجر به افزایش قطر ذرات می‌شود.

شکل ۱۴ قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در دامنه ارتعاشات مختلف و در فرکانس‌های ارتعاشات متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات قطر ذرات تبخیر شده کمتر می‌شود که در بخش قبل به جزئیات و دلایل آن پرداخته شده است.

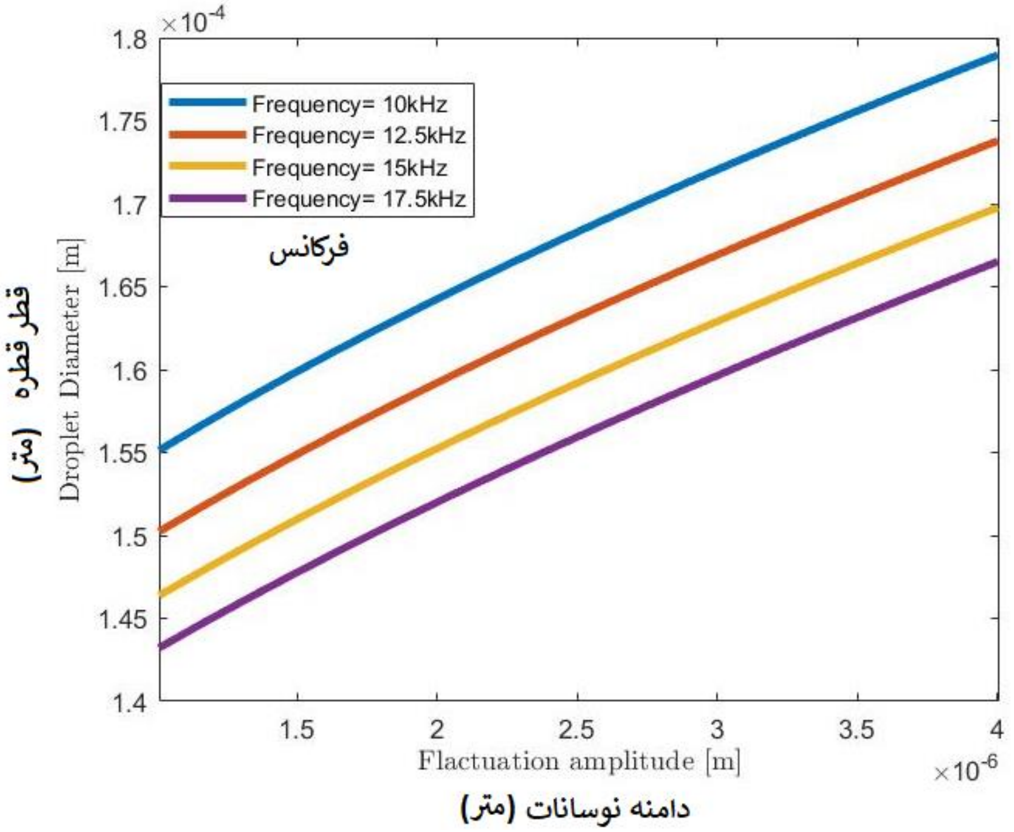


شکل ۱۳- قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در دامنه های ارتعاشات مختلف و در دمای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس‌های برابر ۱۵ کیلوهرتز)

Fig. 13- Diameter of ultrasonic evaporated droplets at different vibration amplitudes and at different milk temperatures

(Dryer gas temperature equals to 100 ° C and frequencies equals to 15 kHz)



شکل ۱۴- قطر قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در دامنه‌های ارتعاشات مختلف و در فرکانس‌های متفاوت

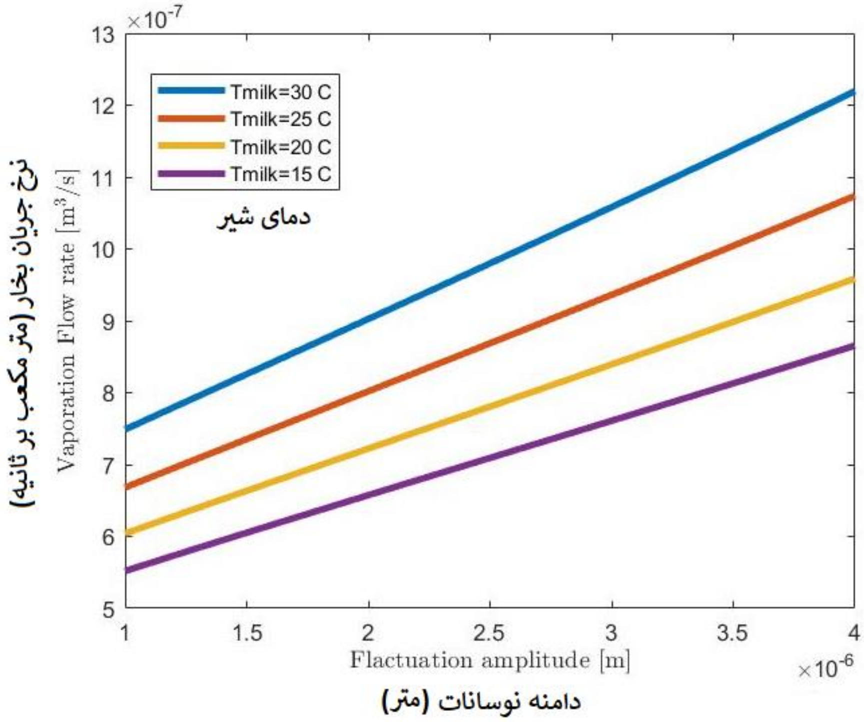
(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 14- Diameter of ultrasonic evaporated droplets at different vibration amplitudes and at different frequencies

(Dryer gas temperature is 100 ° C and milk temperature is 20 ° C)

در شکل ۱۵ تأثیر دامنه ارتعاشات در دماهای شیر متفاوت بر نرخ تبخیر به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دامنه ارتعاشات نرخ تبخیر به روش التراسونیک افزایش می‌یابد. بدین صورت که در دمای شیر ۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دامنه ارتعاشات از ۱ میکرون به ۴ میکرون باعث افزایش ۵۶/۳ درصدی نرخ تبخیر می‌شود. نکته دیگر اینکه با افزایش دمای شیر شیب افزایشی نرخ تبخیر نیز بیشتر می‌شود بطوری‌که در دمای شیر ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دامنه ارتعاشات از ۱ میکرون به ۴ میکرون باعث افزایش ۶۲٫۶ درصدی نرخ تبخیر می‌شود. دلیل افزایش نرخ تبخیر با افزایش دامنه ارتعاشات بزرگتر شدن قطرات در فرکانس ثابت است. با توجه به فرکانس ارتعاشات ثابت سرعت جت ثابت بوده اما با افزایش دامنه ارتعاشات حجم جت زیاد شده و این منجر به افزایش نرخ تبخیر می‌شود.

شکل ۱۶ نرخ تبخیر به روش التراسونیک در دامنه ارتعاشات مختلف و در فرکانس‌های ارتعاشات متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات نرخ تبخیر کمتر می‌شود که در بخش قبل به جزئیات و دلایل آن پرداخته شده است.

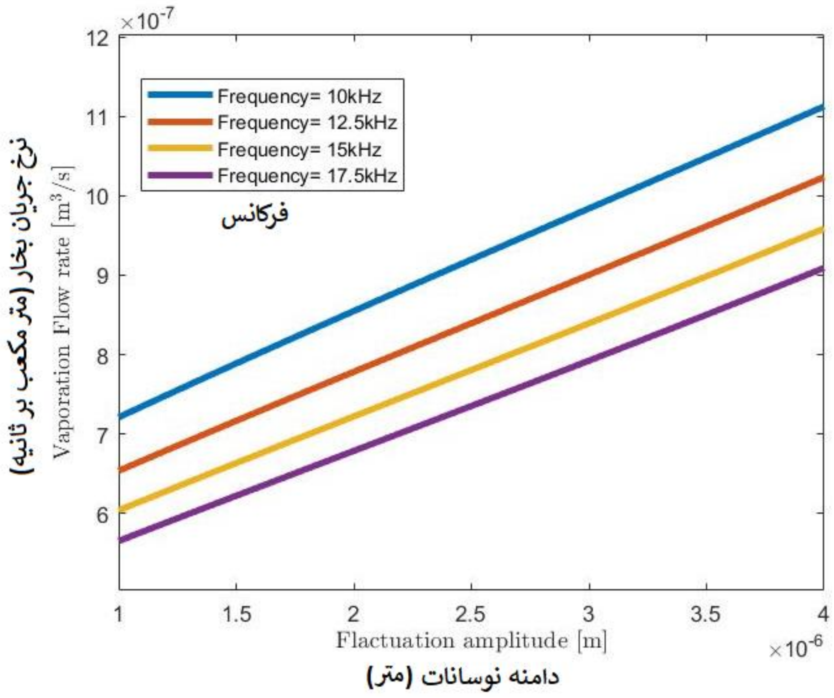


شکل ۱۵- نرخ تبخیر به روش التراسونیک در دامنه‌های ارتعاشات مختلف و در دماهای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز)

Fig. 15- Ultrasonic evaporation rate at different vibration amplitudes and at different milk temperatures

(Dryer gas temperature equals to 100 ° C and vibration frequency equals to 15 kHz)



شکل ۱۶- نرخ تبخیر به روش التراسونیک در دامنه‌ها و فرکانس‌های ارتعاشات مختلف

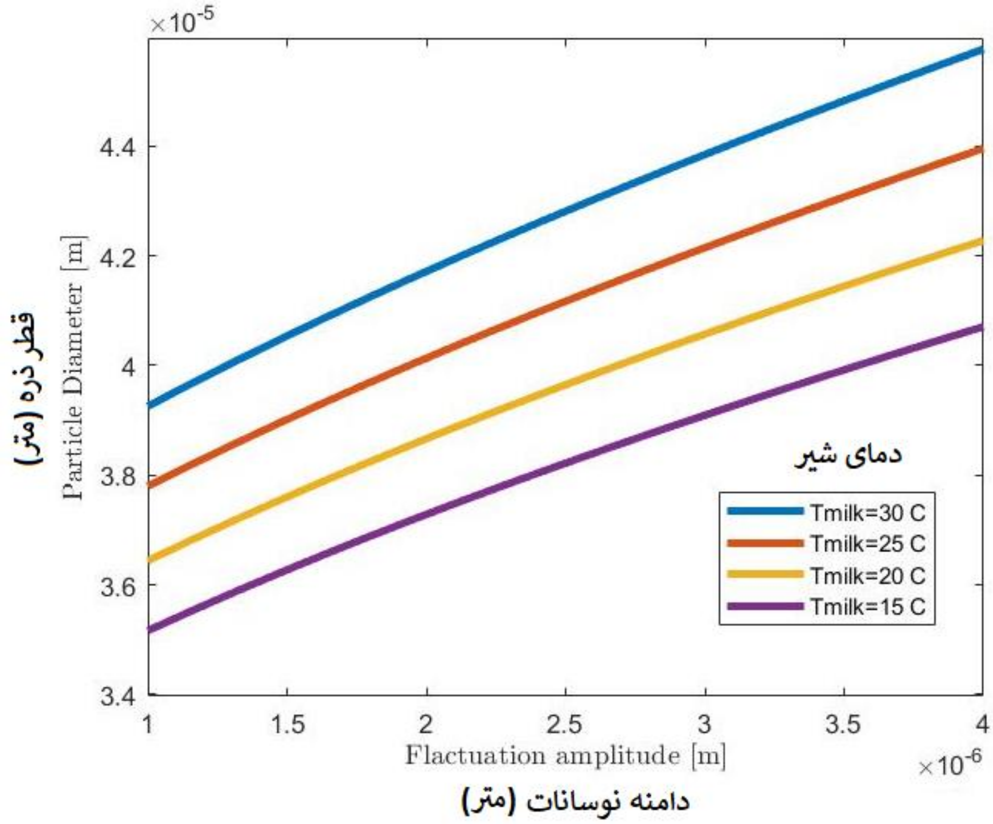
(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 16- Ultrasonic evaporation rate at different amplitudes and frequencies of vibrations

(Dryer gas temperature is 100 ° C and milk temperature is 20 ° C)

در شکل ۱۷ تأثیر دامنه ارتعاشات در دماهای شیر متفاوت بر قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دامنه ارتعاشات قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک افزایش می‌یابد. بدین صورت که در دمای شیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دامنه ارتعاشات از ۱ میکرون به ۴ میکرون باعث افزایش ۱۵٫۶ درصدی قطر پودر تولید شده می‌شود. دلیل افزایش قطر پودر تولید شده این است که با افزایش دامنه ارتعاشات قطر ذرات جدا شده از سطح مایع بیشتر شده و با توجه به حجم بیشتر ماده جامد در آن قطر پودر تولیدی نیز افزایش خواهد یافت.

شکل ۱۸ قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک در دامنه ارتعاشات مختلف و در فرکانس‌های ارتعاشات متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش فرکانس ارتعاشات قطر پودر تولید شده کمتر می‌شود که در بخش قبل به جزئیات و دلایل آن پرداخته شده است.

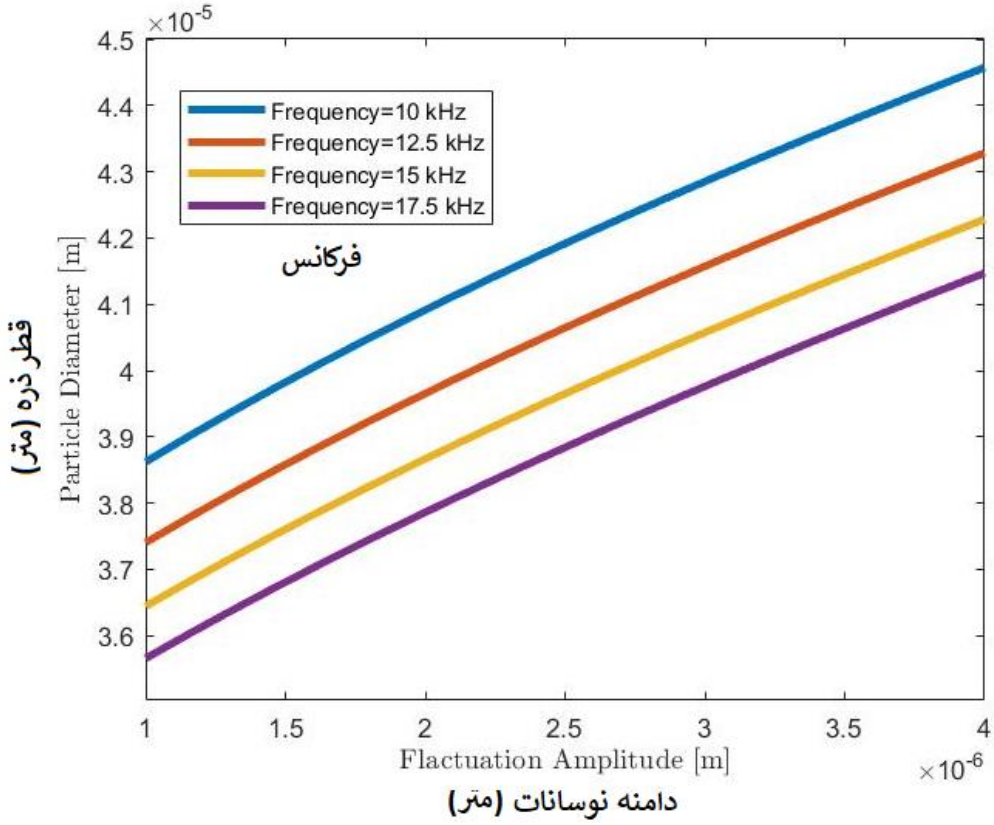


شکل ۱۷- قطر پودر تولید شده پس از تبخیر به روش التراسونیک و خشک شدن در دامنه ارتعاشات مختلف و در دماهای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلو هرتز)

Fig. 17- The diameter of the produced powder after ultrasonic evaporation and drying in different vibration amplitudes and at different milk temperatures

(Dryer gas temperature equals to 100 ° C and vibration frequency equals to 15 kHz)



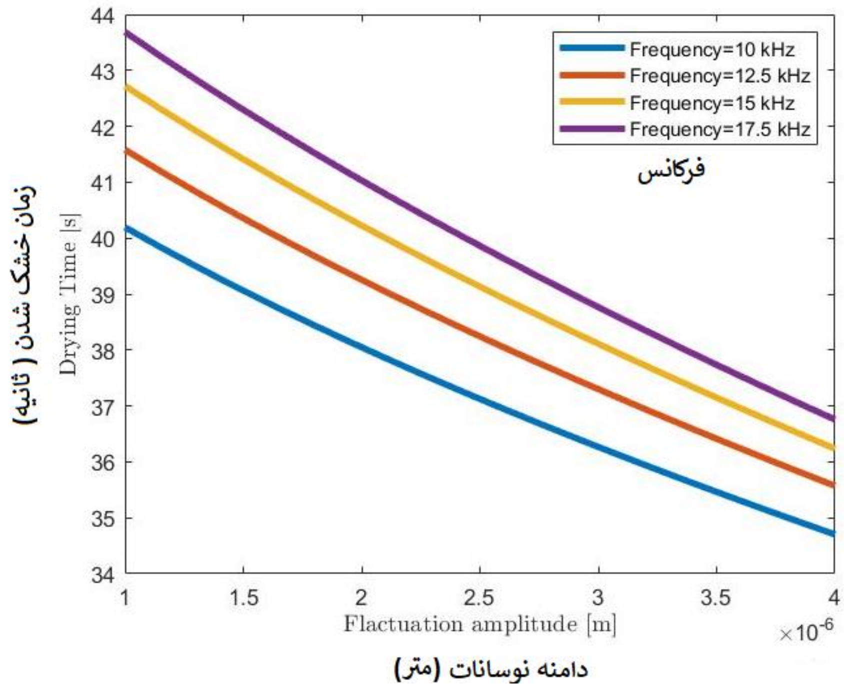
شکل ۱۸- قطر پودر تولید شده پس از تبخیر به روش التراسونیک و خشک شدن در دامنه و فرکانس ارتعاشات مختلف

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 18- Diameter of produced powder after ultrasonic evaporation and drying at different amplitudes and frequencies of vibrations

(Dryer gas temperature is 100 ° C and milk temperature is 20 ° C)

در شکل ۱۹ تأثیر دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های ارتعاشات مختلف بر زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک بررسی شده است. در این حالت دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دامنه ارتعاشات زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک کاهش می‌یابد. بدین صورت که در فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز افزایش دامنه ارتعاشات از ۱ میکرون به ۴ میکرون باعث کاهش ۱۴/۴ درصدی زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده تولید شده می‌شود. دلیل کاهش زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده با افزایش دامنه ارتعاشات و افزایش نرخ تبخیر مقدار محتوی رطوبت و رطوبت مطلق در خروجی افزایش یافته و طبق روابط ۱۷ و ۱۸ منجر به کاهش T_{wb} و زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده می‌شود. شکل ۲۰ زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در دامنه ارتعاشات مختلف و در دمای شیر متفاوت را نشان می‌دهد که در آن دمای گاز خشک‌کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلوهرتز است. همانطور که از این نمودار مشخص است با افزایش دمای شیر زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده کمتر می‌شود که در بخش قبل به جزئیات و دلایل آن پرداخته شده است.

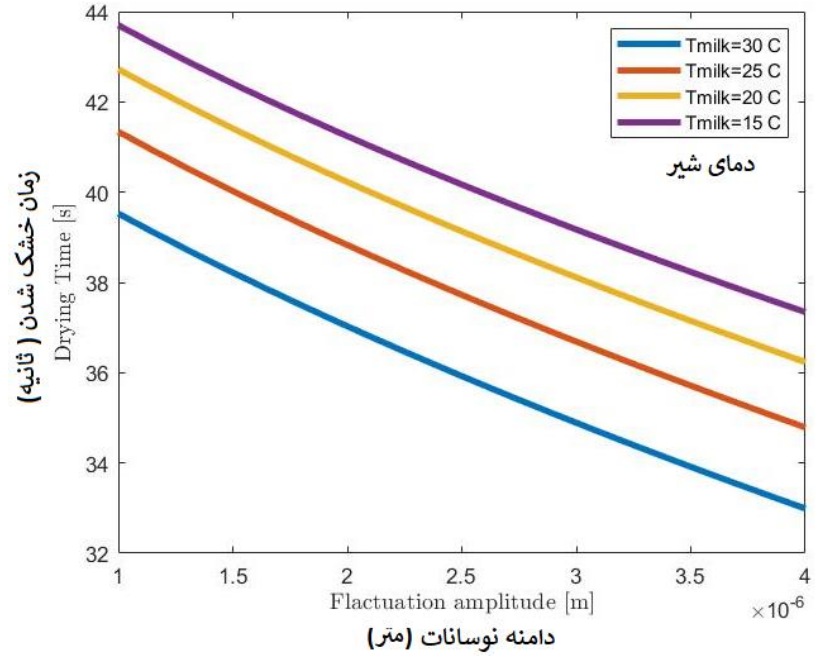


شکل ۱۹- زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در فرکانس‌های مختلف و در دامنه‌های ارتعاشات متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای شیر برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 19- Time required for drying the ultrasonic evaporated droplets at different frequencies and in different vibration amplitudes

(Dryer gas temperature equals to 100 ° C and valve temperature equals to 20 ° C)



شکل ۲۰- زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک در دامنه‌های ارتعاشات و در دمای شیر متفاوت

(دمای گاز خشک کن برابر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ارتعاشات برابر ۱۵ کیلو هرتز)

Fig. 20- Time required for drying the ultrasonic evaporated droplets at vibration amplitudes and at different milk temperatures

(Drying gas temperature equals to 100 ° C and vibration frequency equals to 15 kHz)

جدول ۱- خلاصه نتایج شبیه‌سازی
Table 1- Summary of simulation results

متغیر مستقل (Variable)	درصد تغییرات (Percent of variation)			
	زمان خشک شدن (Drying time)	قطر پودر (Powder diameter)	نرخ تبخیر (Evaporation rate)	قطر ذرات بخار (Diameter of steam particles)
فرکانس نوسان (Vib. frequency)	+21.4%	-17.2%	-44%	-18%
دامنه نوسان (Vib. Amplitude)	-14.4%	+15.6%	+56.3%	+15.8%
دمای شیر (Milk Temperature)	-12.4%	+11.5%	+34.8%	+11.3%

خلاصه‌ای از درصد تغییرات پارامترهای مختلف با تغییر متغیرهای مستقل مسئله در جدول ۱ آمده است. در این جدول فرکانس نوسان از ۱۰ کیلوهرتز به ۴۰ کیلوهرتز، دامنه نوسان از ۱ میکرون به ۴ میکرون و دمای شیر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد به ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است و درصد تغییرات قطر ذرات تبخیر شده، نرخ تبخیر، قطر پودر بدست آمده و زمان خشک شدن ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرآیند تبخیر التراسونیک شیر کامل و سپس خشک‌سازی و تولید پودر شیر بصورت ریاضی و ترمودینامیکی مدلسازی شده است. بطوری‌که پس از بررسی کارهای انجام شده در این زمینه و استخراج روابط و معادلات حاکم، کد محاسباتی به کمک نرم‌افزار MATHLAB نوشته شد و پس از اطمینان از اینکه شرایط حل در محدوده مورد نظر معادلات ارائه شده هستند به ارائه نتایج پرداخته شد. در کار حاضر تأثیر فرکانس و دامنه ارتعاشات التراسونیک و همچنین دمای اولیه شیر بر قطر ذرات تبخیر شده، نرخ تبخیر، قطر پودر تولید شده و زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک بررسی شده است. اهم و خلاصه نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر در ادامه آمده است:

- با افزایش دامنه ارتعاشات زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده به روش التراسونیک کاهش یافته و همچنین قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک افزایش می‌یابد.
- با افزایش دامنه ارتعاشات قطر ذرات تبخیر شده از سطح و همچنین نرخ تبخیر به روش التراسونیک افزایش می‌یابد. که با افزایش دمای شیر شیب افزایشی نرخ تبخیر نیز بیشتر می‌شود.
- با افزایش دمای شیر زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده کاهش یافته اما قطر پودر تولید شده بیشتر می‌شود.
- با افزایش دمای شیر نرخ تبخیر و همچنین قطر ذرات تبخیر شده به روش التراسونیک بیشتر می‌شود.
- با افزایش فرکانس ارتعاشات زمان لازم برای خشک شدن قطرات تبخیر شده و قطر پودر تولید شده به روش التراسونیک افزایش می‌یابد.
- با افزایش فرکانس ارتعاشات نرخ تبخیر و همچنین قطر ذرات تبخیر شده به روش التراسونیک کاهش می‌یابد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره ابلاغیه UTH:1399/2/1372 از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تربت-حیدریه می‌باشد که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

1. Arun, B.S., Mariappan, V., & Maisotsenko, V. (2020). Experimental study on combined low temperature regeneration of liquid desiccant and evaporative cooling by ultrasonic atomization, *International Journal of Refrigeration* 112: 100-09. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.023.
2. Bakshi, A.S., & Smith, D.E. (1984). Effect of fat content and temperature on viscosity in relation to pumping requirements of fluid milk products, *Journal of Dairy Science* *67*(6): 1157-1160. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81417-4.
3. Berlin, E., & Pallansch, M.J. (1963). Influence of drying methods on density and porosity of milk powder granules, *Journal of Dairy Science 46*(8): 780-784. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(63)89148-1.

4. Briceño-Gutierrez, D., Salinas-Barrera, V., Vargas-Hernández, Y., Gaete-Garretón, L., & Zanelli-Iglesias, C. (2015). On the ultrasonic atomization of liquids, *Physics Procedia* 63: 37-41. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.03.006.
5. Broniarz-Press, L., Sosnowski, T.R., Matuszak, M., Ochowiak, M., & Jabłczyńska, K. (2015). The effect of shear and extensional viscosities on atomization of Newtonian and non-Newtonian fluids in ultrasonic inhaler, *International Journal of Pharmaceutics* 485: 41-49. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2015.02.065.
6. Candia-Muñoz, N., Ramirez-Bunster, M., Vargas-Hernández, Y., & Gaete-Garretón, L. (2015). Ultrasonic spray drying vs high vacuum and microwaves technology for blueberries, *Physics Procedia* 70: 867-71. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.178.
7. D'Addio, S.M., John G.C., Chi Lip Kwok Ph., Robert, K., Prud, H., & Hak-Kim, C. 2012. Constant size, variable density aerosol particles by ultrasonic spray freeze drying, *International Journal of Pharmaceutics* 427: 185-91. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.01.048.
8. Deepu, P., Chang P., & Moghaddam, S. (2018). Dynamics of ultrasonic atomization of droplets, *Experimental Thermal and Fluid Science* 92: 243-47. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.11.021.
9. Faraday, M. (1831). On the forms and states assumed by fluids in contact with vibrating elastic surfaces, *Phil. Trans. R. Soc. London* 52: 319–340.
10. Grasmeijer, N. (2019). Identifying critical process steps to protein stability during spray drying using a vibrating mesh or a two-fluid nozzle, *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 128: 152-157. https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.11.027.
11. Koumei, H., Takenaka, N., Nanzai, B., Okitsu, K., Bandow, H., & Maeda, Y. (2009). Influence of adding salt on ultrasonic atomization in an ethanol–water solution, *Ultrasonics Sonochemistry* 16: 150-54. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.07.002.
12. Isleroglu, H., Turker, I., Tokatli, M., & Koc, B. (2018). Ultrasonic spray-freeze drying of partially purified microbial transglutaminase, *Food and Bioproducts Processing* 111: 153-64. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.08.003.
13. Kim, H., Jaegeun, L., & You-Yeon, W. (2015). A simple derivation of the critical condition for the ultrasonic atomization of polymer solutions, *Ultrasonics* 61: 20-24. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.04.007.
14. Kirpalani, D.M., & Suzuki, K. (2011). Ethanol enrichment from ethanol–water mixtures using high frequency ultrasonic atomization, *Ultrasonics Sonochemistry* 18: 1012-17. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.05.013.
15. Kudo, T., Kazuhiko, S., Sankoda, K., Norikazu, N., & Nii, S. (2017). Effect of ultrasonic frequency on size distributions of nanosized mist generated by ultrasonic atomization, *Ultrasonics Sonochemistry* 37: 16-22. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.019.
16. Lang, R.J. (1962). Ultrasonic atomization of liquids, *Journal Acoust. Soc. Am.* 34: 6–8.
17. Lebedev, E., Gordienko, M., Troyankin, A., & Menshutina, N. (2017). CFD Simulation of spray drying with ultrasonic dispersion in Antonio Espuña, Moisès Graells and Luis Puigjaner (eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Elsevier). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50006-4.
18. Li, W., Pan, Y., Yao, Y., & Dong, M., (2018). Modeling and parametric study of the ultrasonic atomization regeneration of desiccant solution, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127: 687-702. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.001.
19. Lisboa, H.M., Duarte, M.E., & Cavalcanti-Mata, M.E. (2018). Modeling of food drying processes in industrial spray dryers, *Food and Bioproducts Processing* 107: 49-60. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.006.
20. Naidu, H., Kahraman, O., & Feng, H. (2022). Novel applications of ultrasonic atomization in the manufacturing of fine chemicals, pharmaceuticals, and medical devices, *Ultrasonics Sonochemistry* 86: 105984. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105984.
21. Peskin, R.L., & Raco, R.J. (1963). Ultrasonic atomization of liquids, *Journal Acoust. Soc. Am.* 35: 1378–1381.
22. Rajan, R., & Pandit, A.B. (2001). Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization, *Ultrasonics* 39: 235–255. https://doi.org/10.1016/S0041-624X(01)00054-3.
23. Ramisetty, K.A., Pandit, A.B., & Gogate, P.R. (2013). Investigations into ultrasound induced atomization, *Ultrasonics Sonochemistry* 20: 254-64. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.05.001.
24. Rayleigh, L. (1883). On the crispation of fluid resting upon a vibrating support, *Phil. Mag.* 15: 50–58.
25. Samborska, K. (2022). Innovations in spray drying process for food and pharma industries, *Journal of Food Engineering* 321: 110960. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110960.

26. Tatar Turan, F., Cengiz, A., & Kahyaoglu, T. (2015). Evaluation of ultrasonic nozzle with spray-drying as a novel method for the microencapsulation of blueberry's bioactive compounds, *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 32: 136-45. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.09.011.
27. Tembely, M., Lecot, C., & Soucemarianadin, A. (2011). Prediction and evolution of drop-size distribution for a new ultrasonic atomizer, *Applied Thermal Engineering* 31: 656-67. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.09.027.
28. Vehring, R. (2008). Pharmaceutical particle engineering via spray drying. *Pharmaceutical Research 25*(5): 999-1022.
29. Walzel, P. (1993). Liquid atomisation, *International Chemical Engineering* 33: 46-60.
30. Watson, P.D. (1956). *Effect of variations in fat and temperature on the surface tension of various milks*, Fifty-first Annual Meeting, American Dairy Science Association, Storrs, Connecticut, June 19-21.
31. Wisutmethangoon, S., Plookphol, T., & Sungkhaphaitoon, P. (2011). Production of SAC305 powder by ultrasonic atomization, *Powder Technology* 209: 105-11. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.02.016.
32. Yang, Z., Lin, B., Zhang, K., & Lian, Z. (2015). Experimental study on mass transfer performances of the ultrasonic atomization liquid desiccant dehumidification system, *Energy and Buildings* 93: 126-36. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.035.
33. Yang, Z., Zhang, K., Yunho, M., & Lian, Z. (2016). Performance investigation on the ultrasonic atomization liquid desiccant regeneration system, *Applied Energy* 171: 12-25. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.008.
34. Yang, Z., Zhang, K., Yunho, M., & Lian, Z. (2014). Improvement of the ultrasonic atomization liquid desiccant dehumidification system, *Energy and Buildings* 85: 145-54. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.033.
35. Yao, Ye., Wei, L., & Yixiong, H. (2020). Modeling and performance investigation on the counter-flow ultrasonic atomization liquid desiccant regenerator, *Applied Thermal Engineering* 165: 14573. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114573.
36. Ziaee, A. (2020). A rational approach towards spray drying of biopharmaceuticals: The case of lysozyme, *Powder Technology* 366: 206-215. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.057.
37. Zhang, K., Yang, Z., Lian, Z., & Li, X. (2017). Simulation on regeneration performance for the ultrasonic atomization liquid desiccant system, *Procedia Engineering* 205: 2925-32. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.101.